

УДК: 621.771:614.842

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ СТЕРЖНЕВОЙ АРМАТУРЫ КЛАССА ПРОЧНОСТИ 500 МПа НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЕ ОГНЕСОХРАННОСТИ

ИВЧЕНКО А. В.^{1*}, к.т.н., с.н.с.

ГУЛЬ Ю. П.^{2*}, к.т.н., доц.

ЧМЕЛЕВА В. С.^{3*}, к.т.н., доц.

ТЕСЛЮК Н.О.^{4*},

ЯКУШЕВ А.С.^{5*},

^{1*}Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепр, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: armst_2000@mail.ru, ORCID 0000-0002-4518-1744

^{2*}Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепр, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua, ORCID 0000-0003-3754-7731

^{3*}Кафедра термической обработки металлов, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепр, Украина, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua

^{4*}ПАО "АрселорМиттал Кривой Рог", ул. Криворожстали, 1, 50095, Кривой Рог, тел. +38(056) 499-55-52, e-mail: Natalya.Teslyuk@arselormittal.com

^{5*}ПАО "Днепрометиз", 49081, Украина, г. Днепр, пр. Слобожанский, 20, +38 (056) 376-25-25, email: as.yakushev@dm.severstalmetiz.com

Аннотация. *Цель.* Путем исследования прочностных свойств образцов продукции, подвергнутых нагреву и последующему охлаждению (тепловое воздействие в условиях пожара) провести сравнительный анализ огнестойкости арматуры класса 500МПа, произведенной по упрочняющим технологиям: термомеханического упрочнения, холодного деформирования и легирования. *Методика.* Тепловое воздействие в условиях пожара имитировали путем нагрева образцов в печи до температур 200, 300, 400, 450, 500, 550, 600, 700 и 800°C и выдержки в течение 1 часа с последующим охлаждением. Для сравнительных испытаний использовали образцы арматуры в исходном состоянии, которые не были подвергнуты нагреву. Испытания образцов арматуры на растяжение проводили согласно нормативной документации при комнатной температуре с записью диаграмм деформации и разрушения. *Результаты.* Установлено, что арматура класса прочности 500 МПа, полученная по технологиям, которые обеспечивают упрочнение путем легирования марганцем и кремнием, путем термомеханического упрочнения (ТМУ) с прокатного нагрева и путем холодной деформации (ХД) горячедеформированной заготовки, - имеют практически одинаковые характеристики огнестойкости до температур нагрева 500-550°C. *Научная новизна.* Впервые показана зависимость интенсивности разупрочнения арматуры при нагреве выше 500...550°C от преимущественного типа дефектов кристаллического строения, увеличение концентрации которых дает эффект упрочнения. *Практическая значимость.* Увеличение объемов использования в строительстве холоднодеформированного арматурного проката класса прочности В500С.

Ключевые слова: арматура, технология, температура, нагрев, прочность, огнестойкость, тип дефектов кристаллического строения.

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЇ ЗМЦНЕННЯ СТРИЖНЕВОЇ АРМАТУРИ КЛАСУ МІЦНОСТІ 500 МПа НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЇЇ ВОГНЕЗБЕРЕЖЕННЯ

ИВЧЕНКО О. В.^{1*}, к.т.н., с.н.с.

ГУЛЬ Ю. П.^{2*}, к.т.н., доц.

ЧМЕЛЬОВА В. С.^{3*}, к.т.н., доц.

ТЕСЛЮК Н.О.^{4*},

ЯКУШЕВ О.С.^{5*},

^{1*}Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: armst_2000@mail.ru, ORCID 0000-0002-4518-1744

^{2*}Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua, ORCID 0000-0003-3754-7731

^{3*}Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua

^{4*}ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг», 50095, Україна, Дніпропетровська область, Кривий Ріг, вул. Орджонікідзе, 1, тел. +380(56) 499-55-52, e-mail: Natalya.Teslyuk@arselormittal.com

^{5*}ПАТ "Днепрметиз", 49081, Україна, м. Дніпро, пр. Слобожанський, 20, +38 (056) 376-25-25, email: as.yakushev@dm.severstalmetiz.com

Анотація. Мета. Шляхом дослідження міцнісних властивостей зразків продукції, підданих нагріванню і подальшому охолодженню (тепловий вплив в умовах пожежі) провести порівняльний аналіз вогнезбереження арматури класу 500МПа, виробленої за зміцнюючі технології: термомеханічного зміцнення, холодного деформування і легування. **Методика.** Тепловий вплив в умовах пожежі імітували шляхом нагрівання зразків в печі до температур 200, 300, 400, 450, 500, 550, 600, 700 і 800 °С і витримки протягом 1 години з наступним охолодженням. Для порівняльних випробувань використовували зразки арматури в початковому стані, що не були піддані нагріванню. Випробування зразків арматури на розтяг проводили згідно з нормативною документацією при кімнатній температурі з записом діаграм деформації і руйнування. **Результати.** Встановлено, що арматура класу міцності 500 МПа, отримана за технологіями, які забезпечують зміцнення шляхом легування марганцем і кремнієм, шляхом термомеханічного зміцнення (ТМУ) з прокатного нагріву і шляхом холодної деформації (ХД) гарячо деформовані заготовки, мають практично однакові характеристики вогнезбереження до температур нагрівання 500-550 °С. **Наукова новизна.** Вперше показана залежність інтенсивності втрати міцності арматури при нагріванні вище 500 ... 550 °С від переважного типу дефектів кристалічної будови збільшення концентрації яких дає ефект зміцнення. **Практична значимість.** Збільшення обсягів використання в будівництві холоднодеформованого арматурного прокату класу міцності В500С.

Ключові слова: арматура, технологія, температура, нагрів, міцність, вогнезбереження, тип дефектів кристалічної будови.

EFFECT OF HARDENING TECHNOLOGY REINFORCEMENT BARS STRENGTH CLASS 500 MPa ON THE CHARACTERISTICS OF ITS FIRE-DURABILITY

IVCHENKO A. V.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Senior Research Officer*

GUL Yu. P.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Associate professor*

CHMELEVA V. S.^{3*}, *Cand. Sc. (Tech.), Associate professor*

TESLYUK N.O.^{4*}

YAKUSHEV A.S.^{5*}

^{1*} Department of metal heat treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Avenue, 4, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: armst_2000@mail.ru, ORCID0000-0002-4518-1744

^{2*} Department of metal heat treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Avenue, 4, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua, ORCID0000-0003-3754-7731

^{3*} Department of metal heat treatment, National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Avenue, 4, 49600, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-24-53, e-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua

^{4*} PJSC "Arcelor Mittal Kryvyi Rih", 50095, Ukraine, Dnepropetrovsk region, Kryviy Rih, Ordzhonikidze st., 1, tel. +380(56) 499-55-52, e-mail: Natalya.Teslyuk@arselormittal.com

^{5*} PJSC "Dneprometiz", 49000, Ukraine, Dnipro, Slobozhanskyi Avenue, 20, +38 (056) 376-25-25, as.yakushev@dm.severstalmetiz.com

Annotation. Purpose. Investigating the strength properties of the samples of products subjected to heating and subsequent cooling (thermal action under fire conditions), a comparative analysis of the fire safety of the 500MPa reinforcement bars produced by strengthening technologies: thermomechanical hardening, cold deformation and alloying. **Methodology.** The thermal effect in the fire conditions was simulated by heating the samples in the furnace to temperatures of 200, 300, 400, 450, 500, 550, 600, 700 and 800 °C and holding for 1 hour followed by cooling. For comparative tests, the reinforcement bars specimens were used in the initial state, which were not subjected to heating. Testing of the tensile reinforcement specimens was carried out according to the normative documentation at room temperature with the recording of the deformation and fracture diagrams. **Findings.** It is established that the reinforcement of the strength class of 500 MPa, obtained by technologies that provide hardening by doping with manganese and silicon, by thermomechanical hardening from rolling heating and by cold deformation of the hot-worked billet, have practically identical fire-protection characteristics up to heating temperatures of 500-550 °C. **Originality.** For the first time, the dependence of the intensity of softening of the reinforcement upon heating above 500 ... 550 °C on the preferential type of defects of the crystalline structure, the increase in the concentration of which gives the effect of hardening. **Practical value.** Increase in the use of cold-deformed reinforcing bars of strength class V500C in construction.

Keywords: reinforcement bars, technology, temperature, heat, strength, fire safety, the type of defects in the crystalline structure

Введение

В настоящее время, в связи с участвовавшими аварийными и чрезвычайными ситуациями (взрывы из-за утечки газа, террористические акты и др.), которые зачастую сопровождаются пожарами, проявляется особый интерес к изучению огнестойкости и огнесохранности железобетонных зданий и сооружений. При этом, хотя имеется ряд нормативных документов (НД), касающихся их расчета и возведения с учетом огнестойкости и огнесохранности [1-3], приходится констатировать, что существуют противоречивые сведения относительно изменения прочностных свойств стальной арматуры после ее нагрева, которые могут происходить в результате пожара [2, 4 – 7]. Это обусловлено отсутствием достоверной информации по воздействию нагревов на изменение свойств арматуры, которая упрочняется по различным технологиям.

Цель

Путем исследования прочностных свойств образцов продукции, подвергнутых нагреву и последующему охлаждению (тепловое воздействие в условиях пожара) провести сравнительный анализ огнесохранности арматуры класса 500МПа, произведенной по упрочняющим технологиям ТМУ, ХД и легирования, при которых упрочнение обусловлено увеличением концентрации дефектов кристаллического строения различных типов.

Методика

Для проведения исследования отобрали образцы арматуры $\varnothing 8,0$ мм класса А400С и А500С в потоке металлургического передела (на ПАО «Арселор Миттал Кривой Рог») и арматуры $\varnothing 8,0$ мм класса В500С в потоке метизного передела (на ПАО «Днепрометиз»). Химический состав продукции представлен в таблице.

Таблица

Химический состав арматуры (массовая доля элементов, %)/ The chemical composition of the reinforcement bars (mass fraction of elements,%)

Марка стали, способ упрочнения	C	Mn	Si	S	P	Cr
20Г2СХ, легирование (1)	0,22	1,44	0,26	0,022	0,031	0,21
Ст3пс, ТМУ (2)	0,18	0,6	0,07	0,028	0,028	-
Ст3пс, ХД (3)	0,2	0,56	0,08	0,023	0,026	-

Тепловое воздействие в условиях пожара имитировали путем нагрева этих образцов в печи до температур 200, 300, 400, 450, 500, 550, 600, 700 и 800 $^{\circ}$ С и выдержке в течение 1 часа с последующим охлаждением. Для сравнительных испытаний использовали образцы арматуры в исходном состоянии, которые не были подвергнуты нагреву. Испытания образцов арматуры на растяжение проводили согласно НД при комнатной температуре с записью диаграмм деформации и разрушения. Характер изменения прочностных свойств арматуры ($\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести, σ_b – временное сопротивление) от воздействия нагрева до различных температур оценивали по абсолютным значения $\sigma_{0,2}$ и σ_b и по отношению значений $\sigma_{0,2}$ и σ_b после нагрева до конкретной температуры и охлаждения к значению тех же свойств, определяемых при комнатной температуре без предварительного нагрева ($\sigma_{0,2}^t / \sigma_{0,2}^{20}$, $\sigma_b^t / \sigma_b^{20}$).

Результаты

Результаты исследований приведены на рис. 1 и 2.

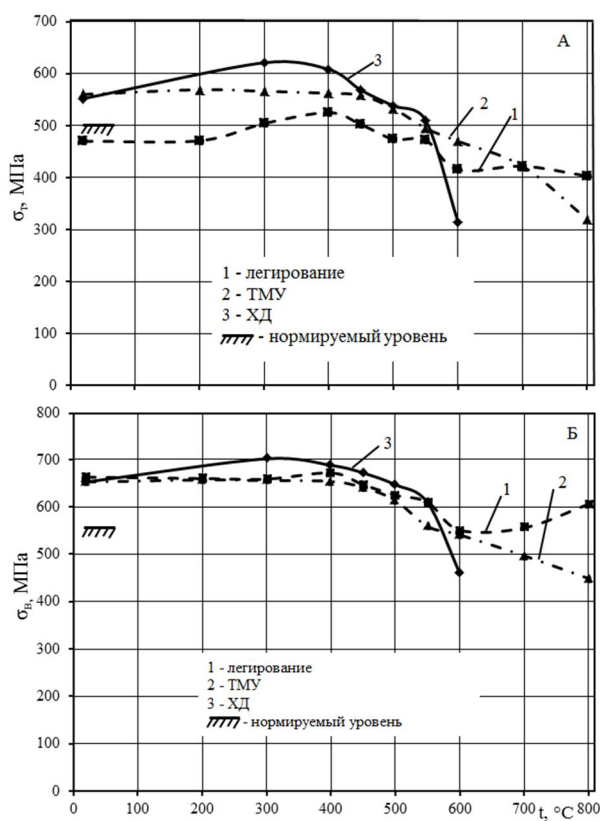


Рис. 1 Изменение предела текучести (А) и временного сопротивления (Б) арматуры, упрочняемой легированием, ТМУ и ХД в зависимости от температуры предварительного нагрева

Из представленных на рис. 1 и 2 данных следует, что горячекатаная арматура, у которой упрочнение достигается за счет легирования стали, после нагрева в исследованном интервале температур сохраняет

первоначальный уровень прочностных свойств (A400С). Арматура, упрочненная ТМУ и ХД на класс 500 МПа сохраняет первоначальный уровень прочности только до температур предварительного нагрева порядка 500-550°C, что является приемлемым в свете требований НД [2]. В последнем предусматривается, что для железобетонных конструкций в качестве защитной изоляции арматуры выступает слой бетона, толщина которого должна быть такой, чтобы во время пожара арматуре не нагревалась выше 500°C. Из рис. 1 и 2 также очевидно, что изменение прочностных свойств ХД арматуры и ТМУ арматуры класса прочности 500 МПа после нагрева до температуры 500-550°C имеют практически одинаковый характер. Поскольку рассмотренные технологии упрочнения приводят к получению различных структурных состояний, то различия в изменении прочностных свойств ($\sigma_{0,2}$ и σ_B) выше 500-550°C позволяют конкретизировать типы структурных состояний, обуславливающие различную интенсивность разупрочнения при нагреве. Легирование арматуры марганцем и кремнием обеспечивают упрочнение в основном за счет диспергирования структурных составляющих вследствие снижения температур распада переохлажденного аустенита (при некотором дополнительном твердорастворном упрочнении феррита), т.е. упрочнение обусловлено увеличении концентрации поверхностных дефектов (КПД), ТМУ дает упрочнение, как за счет роста КПД (причем различного типа), так и за счет повышения плотности линейных дефектов (ПЛД) – дислокаций. Холодная деформация приводит к упрочнению вследствие повышения ПЛД. Удельная свободная энергия линейных дефектов гораздо больше, соответствующей характеристике поверхностных дефектов, почему и термическая устойчивость поверхностных дефектов должна быть выше, что подтверждается экспериментально. Практически важным следствием проведенного анализа является обоснованное направление повышения термической устойчивости упрочнения холоднодеформированной арматуры: повышенная плотность дислокаций, получаемая при холодной деформации, должна в основном достаточно равномерно располагаться в объеме изделия в форме низкоэнергетических дислокационных квазиравновесных границ фрагментов ферритной матрицы.

Научная новизна и практическая ценность

Металлофизический анализ полученных экспериментальных результатов по термической устойчивости упрочнения арматуры, формируемого различными способами, впервые для данного объекта выявил зависимость уровня термической устойчивости упрочнения от основного типа дефектов кристаллического строения, повышение плотности которых дает упрочнение. Полученная в работе информация позволяет обоснованно

расширить область использования холоднодеформированной арматуры класса В500С с гарантированной огнестойкостью до 500°C, а также определить направления работ по повышению огнестойкости такой арматуры выше 500°C.

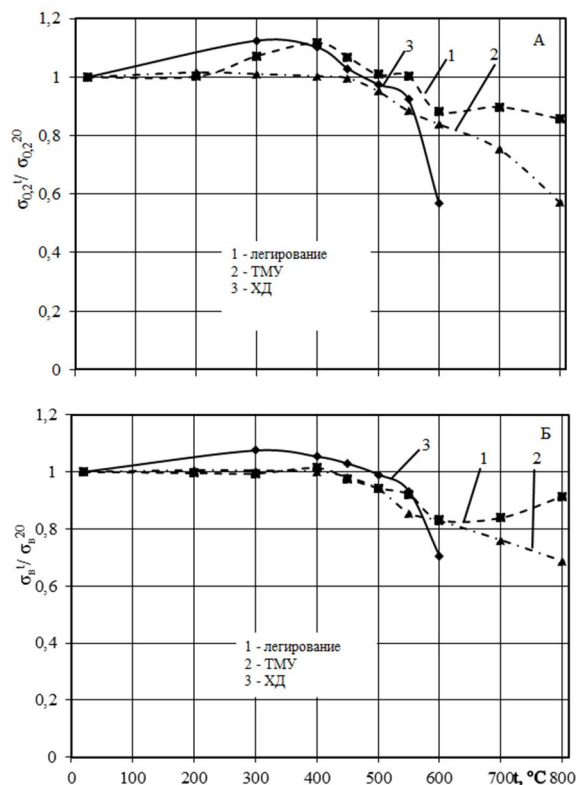


Рис. 2 Изменение соотношений предела текучести (А) и временного сопротивления (Б) арматуры, упрочняемой легированием, ТМУ и ХД в зависимости от температуры предварительного нагрева

Выводы

1. Проведен сравнительный анализ огнестойкости арматурного проката, упрочненного по технологиям легирования, термомеханического упрочнения и холодной деформации.
2. Установлено, что арматура класса прочности 500 МПа обеспечивает требования огнестойкости до 500-550 °С независимо от использования основных способов ее упрочнения, что в частности реабилитирует арматуру, упрочненную холодной деформацией.
3. При нагреве выше 500-550 °С интенсивность разупрочнения при нагреве уменьшается в следующем порядке: упрочнение ХД – упрочнение ТМУ – упрочнению легированием, что соответствует: упрочнение повышенной плотностью дислокаций, то же – повышенной плотностью дислокаций и поверхностных дефектов, то же – повышенной плотностью поверхностных дефектов.
4. Можно обоснованно полагать, что получение в холоднодеформированной арматуре равномерного распределения плотности дислокаций в форме

квазиравновесных низкоэнергетических границ огнесохранности выше 500-550°C.
повысит характеристики ее

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. EN 1992–1–2:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design. – Brussels, 2004.
2. СТО 36554501-006-2006. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. М.:ФГУП "НИЦ "Строительство". -2006. - 78 с.
3. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012. Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004, IDT). – Київ, Мінрегіон України, 2012. – 135 с.
4. Nikolaou J., Papadimitriou G. D. Microstructures and mechanical properties after heating of reinforcing 500 MPa class weldable steels produced by various processes (Tempcore, microalloyed with vanadium and work-hardened) //Construction and Building Materials – 2004. – Т. 18. – №. 4. – С. 243-254.
5. Бабич В. К., Гуль Ю. П., Долженков И. Е. Деформационное старение стали //М.: Металлургия, 1972.- 320 с.
6. Ивченко А.В. Огнесохранность холоднодеформированного арматурного проката класса В500С / А.В. Ивченко, Ю.П. Гуль, Р.В. Панков, П.В. Кондратенко // Бетон и железобетон в Украине. – 2015. – №5. – С. 24-29.
7. Кузнецова И.С. Исследование физико-механических свойств арматуры современного производства при высокотемпературном нагреве и охлаждении / Кузнецова И.С., Суриков И.Н., Востров М.С., Саврасов И.П. // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 12. С. 18-23.

REFERENCES

1. EN 1992–1–2:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1–2: General rules – Structural fire design. – Brussels, 2004.
2. SRT 36554501-006-2006. *Pravila po obespecheniyu ognestoykosti i ognesokhrannosti zhelezobetonnykh konstruksiy*. [Rules for ensuring fire resistance and fire safety of reinforced concrete structures]. Moscow, JSC Research Center of Construction, 2006, 78 p.(in Russian).
3. Minregion Ukrainy. *DSTU-N B EN 1992-1-2:2012. Yevrokod 2.Proyektuvannya zalizobetonnykh konstruksiy.Chastyna 1-2. Zahal'ni polozhennya. Rozrakhunok konstruksiy na vohnestiykist* [State standard of Ukraine N B EN 1992-1-2:2012Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1–2: General rules. Calculation of fire resistance of structures.]Kyiv, 2012, 135 p. (in Ukrainian)
4. Nikolaou J., Papadimitriou G. D. Microstructures and mechanical properties after heating of reinforcing 500 MPa class weldable steels produced by various processes (Tempcore, microalloyed with vanadium and work-hardened) //Construction and Building Materials – 2004. – Т. 18. – №. 4. – С. 243-254.
5. Babych V. K., Gul' YU. P., Dolzhenkov Y. E. *Deformatsyonnoe starenie staly*[Strain ageing of steel] // Moscow: *Metallurgiya* [Metallurgy], 1972, 320 p.(in Russian).
6. Ivchenko A.V., Gul' YU.P., Pankov R.V., Kondratenko P.V. *Ognesokhrannost' kholodnodeformirovannogo armaturnogo prokata klassa V500S* [Fire safety of cold-formed reinforcing bars of class B500C] // *Beton i zhelezobeton v Ukraine*[Concrete and reinforced concrete in Ukraine]. – 2015. – V.5. – pp. 24-29. (in Russian).
7. Kuznetsova I.S., Surikov I.N., Vostrov M.S., Savrasov I.P. *Issledovaniye fiziko-mekhanicheskikh svoystv armatury sovremennogo proizvodstva pri vysokotemperaturnom nagreve i okhlazhdenii* [Investigation of the physical and mechanical properties of modern production fittings under high-temperature heating and cooling] // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and civil construction]. - 2016. – V.12. – pp. 18-23.(inRussian).

Статья рекомендована к публикации д-рами техн. наук, В.И. Большаковым и Д.В. Лаухиным (Украина)